

# 南海 PY30-1 平台上空气溶胶光学特性分析

高 飞 朱建华 杨安安 李 军 韩 冰

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

**摘要** 通过 PY30-1 平台上安装的 CE318 型自动太阳光度计, 利用 2011 年 9 月至 2012 年 10 月长期观测的数据, 分析了南海海域大气气溶胶的光学特性。海上气溶胶光学参数主要包括光学厚度、Angstrom 波长指数、复折射指数、单次散射反照率以及散射相函数。开展海上大气气溶胶光学等特性的观测与研究是进行水色卫星定标与检验的关键。结果表明, 海上气溶胶基本符合沿海气溶胶模式特征。对海上气溶胶光学特性的了解, 可为深入水色卫星的定标与检验提供重要依据。

**关键词** 海洋光学; 气溶胶光学特性; 南海海域; 沿海气溶胶模式

**中图分类号** P733.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s101004

## Analysis of the Aerosol Optical Characteristics on PY30-1 Platform in South China Sea

Gao Fei Zhu Jianhua Yang An'an Li Jun Han Bing

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

**Abstract** By obtaining data of the CE318 automatic sunphotometer installed on the PY30-1 platform from September 2011 to October 2012, the aerosol optical characteristics in South China Sea is studied. The main aerosol optical parameters are aerosol optical thickness, Angstrom exponent, complex refractive exponent, single scattering albedo and scattering phase function. Carrying out research of the aerosol optical characteristics in South China Sea, is an important part of calibration and validation of satellites. The results show that the aerosol optical parameters are similar with the coastal mode, and can be used for calibration and validation of satellites.

**Key words** oceanic optics; aerosol optical characteristics; South China Sea; coastal aerosol mode

**OCIS codes** 010.1110; 010.1310; 010.5620

## 1 引 言

水色卫星遥感器接收到的总辐射中来自海面的信号甚微, 而超过 90% 的辐射来自大气分子散射与气溶胶散射辐射等非海水因素<sup>[1,2]</sup>。在开展水色卫星遥感器替代定标与产品真实性检验中, 气溶胶散射辐射是不确定度最大且必须精确获取的重要因素之一。大气气溶胶是大气辐射平衡中不确定性的一个关键因素, 开展现场大气气溶胶光学等特性的观测与研究就显得尤为重要<sup>[1,3~5]</sup>。

目前, 现场大气气溶胶光学特性观测主要以地基光学遥感手段为主。太阳光度计是国内外普遍采用的、可靠的获取气溶胶光学厚度(AOT)等参数的

观测设备<sup>[6,7]</sup>。当前在国际上有世界气象组织(WMO)的全球大气观测计划(GAW)和气溶胶自动观测网(AERONET)这两大全球气溶胶观测网络, 都把现场观测作为气溶胶研究的核心内容。我国已逐步开展对气溶胶光学等特性的系统观测研究<sup>[8,9]</sup>, 并初步建立起自己的气溶胶观测网络 CAeroNet。但由于国内尚未形成大范围、长时间序列的气溶胶数据集, 且主要以陆地观测为主, 因此开展海上气溶胶光学特性观测与研究意义重大。本文利用南海 PY30-1 平台上自动太阳光度计的长时间序列的遥感数据, 反演南海海域大气气溶胶光学特性参数, 初步分析海上气溶胶特点。

**收稿日期**: 2013-01-01; **收到修改稿日期**: 2013-01-02

**基金项目**: 国家 863 计划(2008AA09A403)和海洋环境要素水色遥感技术与应用示范(2010418030-05)项目资助课题。

**作者简介**: 高 飞(1977—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事大气气溶胶观测技术、水色卫星替代定标与大气校正算法等方面的研究。E-mail: gaofei\_1977@163.com

## 2 观测仪器与数据

利用 PY30-1 平台 (114.94°E, 20.24°N) 上的 CE318EBM9 型自动太阳光度计 (见图 1), 实现了 2011 年 9 月至 2012 年 10 月期间南海海上大气气溶胶的连续观测。通过太阳直射辐射测量实现气溶胶光学厚度、Angstrom 波长指数与浑浊度系数的反演, 并利用“等高度角”天空辐射扫描反演折射指数、单次散射反照率及散射相函数等重要参数。



图 1 PY30-1 平台上 CE318EBM9 型自动太阳光度计

Fig. 1 CE318EBM9 automatic sunphotometer installed on the PY30-1 platform

在观测期间, 仪器设置自动模式进行观测, 自动模式程序可以依据当地时间和大气光学质量的变化自动进行太阳直射和天空散射辐射测量, 并实现数据的实时优化下载, 共得到 167 d 观测数据。由于该海域冬季主要以多云和阴雨天气为主, 最终可用于气溶胶光学参数反演的约占总数据的 49%, 为研究海上气溶胶特性提供了重要参考数据。

## 3 基本原理与质量控制

### 3.1 气溶胶光学厚度消光测量原理

在太阳光度计对准太阳的前提下, 太阳光度计测量得到的中心波长  $\lambda$  处的辐照度可依据 Beer 定律表示<sup>[6,10,11]</sup>, 根据 Beer 定律对整层大气积分可得:

$$E(\lambda) = \alpha E_0(\lambda) \exp[-m(\theta)\tau(\lambda)], \quad (1)$$

式中  $E(\lambda)$  是地表波长  $\lambda$  处的太阳直接辐射辐照度;  $\alpha$  是日地距离校正因子;  $E_0(\lambda)$  是地球大气上界波长  $\lambda$  处的太阳直接辐照度;  $m(\theta)$  是大气光学质量;  $\tau(\lambda)$  是大气总光学厚度, 其包括大气分子与气溶胶的散射和吸收光学厚度。太阳光度计测量的电压响应值正比于入射的太阳辐照度, 因此(1)式可写为

$$V(\lambda) = \alpha V_0(\lambda) \exp[-m(\theta)\tau(\lambda)], \quad (2)$$

式中  $V(\lambda)$  是太阳光度计在地表实测的电压响应值;

$V_0(\lambda)$  是对应于  $E_0(\lambda)$  的电压响应值。气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$  是大气总光学厚度  $\tau(\lambda)$  减去大气分子散射  $\tau_r(\lambda)$  与吸收  $\tau_g(\lambda)$  光学厚度, 即

$$\tau_a(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_r(\lambda) - \tau_g(\lambda), \quad (3)$$

### 3.2 Angstrom 波长指数与浑浊度系数

Angstrom 波长指数与浑浊度系数也都是表征气溶胶光学特征的最基本参数。Angstrom 指出在假定气溶胶粒子谱分布为 Junge 分布时, 气溶胶光学厚度与波长的关系<sup>[12]</sup>为

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为 Angstrom 的波长指数;  $\beta$  为大气浑浊度系数, 即波长 1  $\mu\text{m}$  处的气溶胶光学厚度, 它与垂直气柱内气溶胶质粒总数有关。通过太阳光度计 400~870 nm 范围内各波段获取的气溶胶光学厚度, 利用最小二乘法进行拟合可得到两系数<sup>[13]</sup>。

### 3.3 气溶胶散射特性

在平面平行大气与大气水平方向特性一致的前提下, Nakajima 等<sup>[14~16]</sup>提出一种截断法, 太阳辐射传输方程为

$$\mu \frac{dI(\tau, \Omega)}{d\tau} = I(\tau, \Omega) - \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} I(\tau, \Omega') P(\Omega, \Omega') d\Omega' - \frac{\omega}{4\pi} F_0 P(\Omega, \Omega_0) \exp(-\tau/\mu_0), \quad (5)$$

式中  $I(\tau, \Omega)$  是光学厚度  $\tau$  处沿  $\Omega$  方向的漫射辐射强度,  $\omega$  是单次散射反照率,  $\mu = \cos \theta$  是卫星天顶角  $\theta$  的余弦,  $\mu_0 = \cos \theta_0$  是太阳天顶角  $\theta_0$  的余弦,  $\Omega$  是所考虑的方向, 可以用天顶角的余弦  $\mu$  和方位角  $\phi$  表示,  $P(\Omega, \Omega')$  是散射相函数,  $\Omega'$  是入射辐射的方向,  $d\Omega'$  是立体角元,  $F_0$  是大气层顶的太阳通量密度。利用非线性数值迭代技术对辐射传输方程的数值解进行了研究, 得到了较精确的气溶胶光学特性<sup>[17]</sup>。

### 3.4 云干扰滤除与质量控制

由于太阳光度计采用无人值守的自动观测模式, 那么仪器测量当中由于云遮挡等干扰因素的滤除及质量控制将是非常必要的。因此, 在生成数据集之前, 必须进行云干扰滤除和质量控制, 以下 4 个步骤均来自 AERONET 观测网的数据质控规范<sup>[13]</sup>:

#### 1) 负值滤除

由于仪器定标、温度校正、大气压力及臭氧含量等因素存在一定不确定度, 在气溶胶光学厚度较小时会出现负值现象, 应剔除气溶胶光学厚度小于零的数据。

## 2) 瞬时稳定性判断

仪器的各波段上的连续三次测量判断大气稳定性。当  $\tau_a(500\text{ nm}) < 0.4$  时,各波段上气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$  最大值与最小值之间的差异应小于 0.02; 当  $\tau_a(500\text{ nm}) > 0.4$  时,各波段上气溶胶光学厚度  $\tau_a(\lambda)$  最大值与最小值之间的差异应小于  $0.03 \times \tau_a(\lambda)$ 。

## 3) 全天稳定性判断

利用 500 nm 波段处气溶胶光学厚度  $\tau_a(500\text{ nm})$ (若无 500 nm 波段,则采用 440 nm 波段)的标准偏差来分析当天数据稳定性。若标准偏差大于 0.015, 就应剔除在时间序列中变化快的  $\tau_a$

(500 nm) 数据点。用下式来识别数据变化的快慢,

$$D_\tau = \left\{ \frac{1}{(n-2)} \sum_{i=3}^{n-2} \left[ \frac{(\ln \tau_i - \ln \tau_{i+1}) - (\ln \tau_{i+1} - \ln \tau_{i+2})}{(t_i - t_{i+1})} \right]^2 \right\}^{0.5}, \quad (6)$$

直至  $D_\tau < 16$ 。

## 4) 标准偏差滤除

当天超过 500 nm 波段处气溶胶光学厚度 3 个标准偏差  $\tau_a(500\text{ nm}) \pm 3\sigma$  和 Angstrom 指数 3 个标准偏差  $\alpha \pm 3\sigma$  范围的数据,应标识为质量差。云干扰滤除和质量控制流程如图 2 所示。

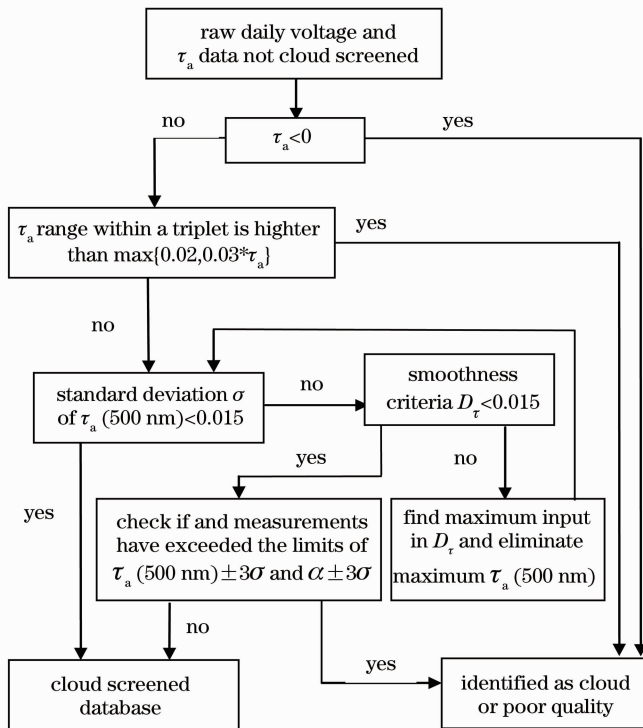


图 2 云干扰滤除和质量控制流程

Fig. 2 Cloud interference filter and quality control processes

## 4 计算结果与分析

2011 年 9 月至 2012 年 10 月期间,平台上气溶胶光学厚度在 1 以内波动,340 nm 波段处气溶胶光学厚度最小可达到 0.07 左右,如图 3 所示。340 nm 波段处气溶胶光学厚度平均值在 0.4 以下。

## 4.1 光学厚度

气溶胶光学厚度是衡量气溶胶粒子对太阳辐射衰减强弱能力的一个重要参数。PY30-1 平台距岸边约 200 km,受到陆源气溶胶影响相对较小,气溶胶类型主要以海洋型为主。气溶胶光学厚度随波长的增加而呈减小趋势,紫外波段对太阳光的衰减方面具有明显的波长选择性,如图 4 所示。同时,发现

1246 nm 波段上的气溶胶光学厚度通常要略大于 1020 nm 波段。1246 nm 波段光学厚度增大的原因:在海上该波段气溶胶复折射指数虚部较大使得其对辐射吸收增强;1246 nm 直径范围内的气溶胶粒子数增加也导致其总体消光作用的增强。这种波长选择性主要是由于气溶胶粒子尺度谱中的中小粒子较多所造成的。海上气溶胶光学厚度相对较小,相当天数的气溶胶光学厚度均小于 0.2。部分天数气溶胶光学厚度较大主要是由于薄云或雾所造成的。另外,一些 870 nm 波段上气溶胶光学厚度小于 0.1,较小的气溶胶光学厚度可以开展卫星的替代定标与产品检验工作。

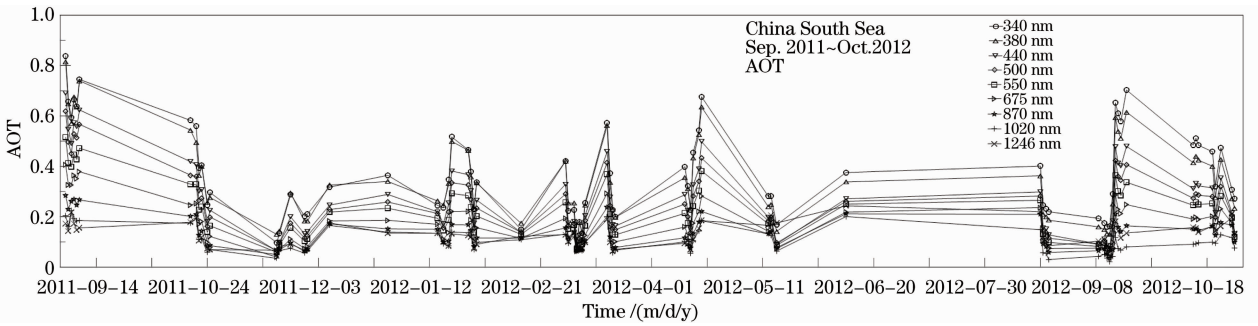


图 3 2011 年 9 月至 2012 年 10 月海上气溶胶的光学厚度变化

Fig. 3 Aerosol optical thickness change of the sea from September 2011 to October 2012

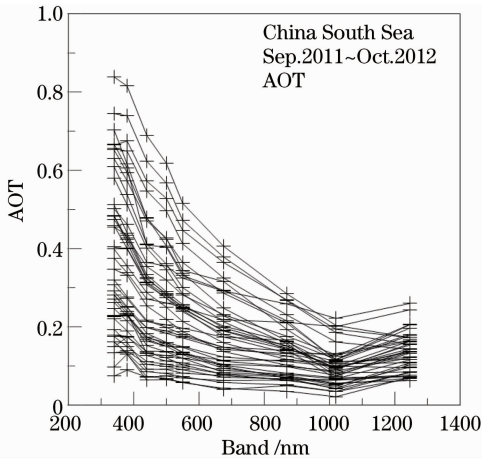


图 4 海上 PY30-1 平台部分观测气溶胶光学厚度随波长的变化

Fig. 4 Aerosol optical thickness changes with wavelength observed on the PY30-1 platform

#### 4.2 Angstrom 波长指数与大气浑浊度系数

波长指数值越小则粒子半径越大,而其值越大则粒子半径越小。海上 Angstrom 波长指数平均约为 0.95,表明粒子粒径相对偏小。浑浊度系数平均约为 0.13,大气相对洁净,能见度大。

#### 4.3 复折射指数

气溶胶粒子复折射指数是表征气溶胶散射和吸收特性的主要参数之一。复折射指数实部反映了气溶胶的散射能力,从图 5 中可看出,气溶胶复折射指数实部多数平均值介于沿海气溶胶 RH95%与沿海气溶胶 RH99%<sup>[18,19]</sup>模式之间,而少数平均值则与沿海气溶胶 RH70%模式相近。海上气溶胶复折射指数与城市灰霾和沙尘气溶胶<sup>[19]</sup>(实部平均约为 1.5)相比略低一些。气溶胶复折射指数虚部主要反映了粒子对辐射的吸收强弱。海上气溶胶复折射指数虚部多数平均值同样介于沿海气溶胶 RH95%与沿海气溶胶 RH99%模式之间,如图 6 所示。

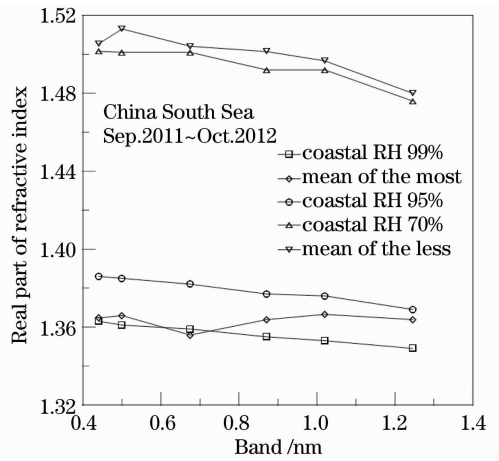


图 5 海上气溶胶复折射指数实部平均值随波长的变化  
Fig. 5 Average value of real part of refractive index of aerosol at sea versus wavelength

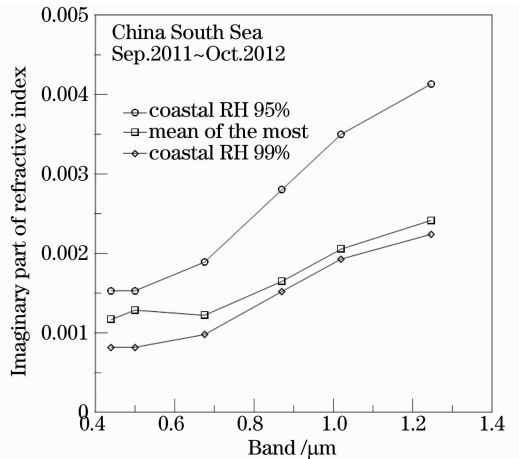


图 6 多数海上气溶胶复折射指数虚部平均值波长变化  
Fig. 6 Average value of imaginary part of refractive index of most aerosols at sea versus wavelength

#### 4.4 单次散射反照率

单次散射反照率用于描述气溶胶粒子总消光中散射所占的比例,也是反映粒子散射能力的重要光学参数。多数海上气溶胶单次散射反照率平均值较

高,其介于沿海气溶胶 RH80%与沿海气溶胶 RH90%模式之间,如图 7 所示。单次散射反照率随波长的增大而减小,1.246  $\mu\text{m}$  波段的单次散射反照率最小。

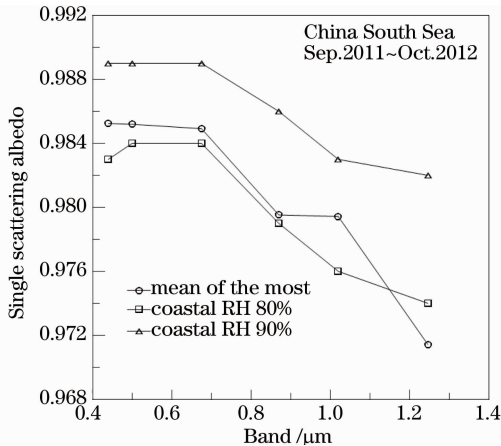


图 7 多数海上气溶胶单次散射反照率平均值随波长的变化

Fig. 7 Mean of single scattering albedo of most coastal aerosol versus wavelength

#### 4.5 散射相函数

散射相函数是描述辐射能角度分布的基本参数。从图 8 可看出,440 nm 与 870 nm 波段处海上气溶胶散射相函数的前向散射很强,大于  $100 \text{ sr}^{-1}$ ,且最小值在  $0.01 \text{ sr}^{-1}$  附近。部分观测数据在  $145^\circ$  散射角附近有一个明显的峰值,且  $180^\circ$  散射角的散射相函数较大。这些特征与沿海气溶胶模式下的散射相函数相同<sup>[15]</sup>。

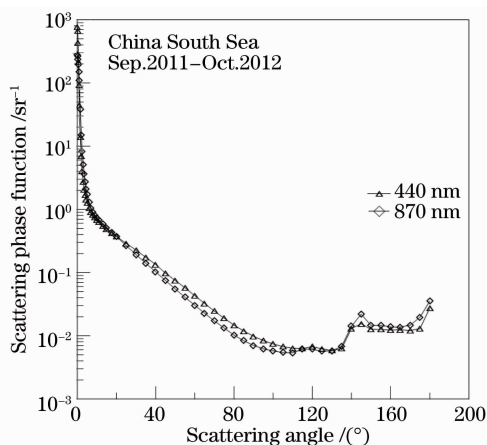


图 8 440 nm 与 870 nm 波段处海上气溶胶散射相函数随平均值角度的变化

Fig. 8 Scattering phase function of coastal aerosol of 440 nm and 870 nm versus mean scattering angle

## 5 结 论

通过对 2011 年 9 月至 2012 年 10 月期间内 PY30-1 平台上的气溶胶光学特性分析,得到以下结论:

1) 在南海固定平台上开展气溶胶长时间序列的观测与分析,初步了解该海域气溶胶特点。气溶胶光学厚度总体偏小,且随波长的增加而减小;Angstrom 波长指数说明海上气溶胶粒子粒径偏小;海上气溶胶的前向散射很强。这些特性与海上气溶胶模式相近。

2) 在水色卫星定标检验当中,气溶胶模式的确立至关重要,其影响到大气校正的精度。从海上实测的气溶胶复折射指数与单次散射反照率这两个重要光学参数出发,与现有模式大气进行比较和分析,初步判断该海域的气溶胶基本符合沿海气溶胶模式特征。今后还需开展长时间序列、大范围的海上气溶胶观测与研究,深入了解我国海上气溶胶特性与时空变化。

## 参 考 文 献

- Robert E. Eplee, Jr., Wayne D. Robinson, Sean W. Bailey *et al.*. Calibration of SeaWiFS. II. Vicarious techniques [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(36): 6701~6718
- Tang Junwu, Chen Qinglian, Tan Shixiong *et al.*. Methods of Oceanic spectral data measurement and analysis [J]. *Marine Science Bulletin*, 1998, **17**(1): 71~79  
唐军武, 陈清莲, 谭世祥等. 海洋光谱测量与数据分析处理方法 [J]. *海洋通报*, 1998, **17**(1): 71~79
- Wang Menghua, Tang Junwu, Shi Wei. MODIS-derived ocean color products along the China east coastal region [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(6): L06611
- Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere column scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501001  
孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气散射偏振度特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0501001
- Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1101005  
王家成, 乔延利, 杨世植等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1101005
- B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker *et al.*. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Rem. Sens. Env.*, 1998, **66**(1): 1~16
- Xu Qingshan, Hu Huanling, Wei Heli. Determination of the atmospheric aerosol model by ground-based spectral extinction measurements [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(9): 1451~1456  
徐青山, 胡欢陵, 魏合理. 地基消光测量确定大气气溶胶模型 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(9): 1451~1456
- Yan Hao, Jiao Meiyang, Bi Baogui *et al.*. Advances in aerosol observation network and corresponding science plan [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006, **26**(1): 110~117

- 延 昊, 矫梅燕, 毕宝贵 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. *气象科学*, 2006, **26**(1): 110~117
- 9 Bo Guangyu, Xie Chenbo, Liu Dong *et al.*. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2526~2532
- 柏广宇, 谢晨波, 刘 东 等. 拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层气溶胶的光学性质[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2526~2532
- 10 B. Schmid, C. Matzler, A. Heimo *et al.*. Retrieval of optical depth and particle size distribution of tropospheric and stratospheric aerosols by means of sun photometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(1): 172~182
- 11 Robert Frouin, Brent Holben, Mark Miller *et al.*. Sun and sky radiance measurements and data analysis protocols [R]. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III. NASA/TM-2003, 2003
- 12 S. F. Biggar, D. I. Gellman, P. N. Slater. Improved evaluation of optical depth components from langley plot data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, **32**(2): 91~101
- 13 A. Smirnov, B. N. Holben, T. F. Eck *et al.*. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **73**(3): 337~349
- 14 T. Nakajima, M. Tanaka, T. Yamauchi. Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19): 2951~2959
- 15 T. Nakajima, T. Takamura, M. Yamano *et al.*. Consistency of aerosol size distributions inferred from measurements of solar radiation and aerosols [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, **64**(5): 765~776
- 16 T. Nakajima, T. Glauco, R. Rao *et al.*. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2672~2686
- 17 Han Bing, Guo Fei, Li Tongji. A method for retrieving aerosol optical properties using multi-angle sky radiance [J]. *Ocean Technology*, 2006, **23**(3): 55~60
- 韩 冰, 高 飞, 李铜基. 气溶胶光学特性的反演方法研究[J]. *海洋技术*, 2006, **25**(3): 55~60
- 18 He Xianqiong, Pan Delu. Ocean-atmosphere; Coupling Vector Radiative Transfer Model and Its Remote Sensing Applications [M]. Beijing: Ocean Press, 2010. 74~87
- 何贤强, 潘德炉. 海洋-大气耦合矢量辐射传输模型及其遥感应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2010. 74~87
- 19 P. Shettle, R. W. Fenn. Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties [R]. AFGL-TR-79-0214, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1979, 94

栏目编辑: 韩 峰